

Prof.dr hab.inż. Bogusław MAJOR czł.rzecz.PAN
Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej
im.Aleksandra Krupkowskiego w Krakowie
Polska Akademia Nauk
Tel.606 260 103
major.b@imim.pl

Kraków 24.08.2026

Recenzja
Rozprawy Doktorskiej
Mgr inż. Artura Kalinowskiego

**p.t. Właściwości eksploatacyjne powłok DLC poddanych
tekstutowaniu laserowemu**

dyscyplinie inżynieria mechaniczna

Promotor: prof.dr hab.inż. Norbert Radek
Promotor pomocniczy: dr inż.Piotr Sęk

WSTĘP

Rozwój laserów i techniki z nimi związanej jest w ostatnich latach bardzo dynamiczny. Za sprawą laserów nastąpił istotny postęp, w tak tradycyjnej nauce jak optyka. Udaje się coraz lepiej opanować zjawiska związane z oddziaływaniem wiązki świetlnej z materią, szczególnie w procesach, w których pojawia się plazma.

Technologie laserowe, ze względu na coraz łatwiejszą dostępność laserów, wprowadzane są obecnie bardzo szeroko do inżynierii materiałowej, w szczególności do inżynierii powierzchni. Wykorzystuje się specyfikę wiązki laserowej umożliwiającą na skupienie dostarczanej energii w postaci ciepła precyzyjnie w wybranym obszarze. Stosując promieniowanie o działaniu ciągłym lub impulsowym i dobierając lasery emitujące różne długości fal przy regulowanym czasie impulsu uzyskuje się nowe możliwości technologiczne. W ostatnich latach technologie laserowe stały się

narzędziem szczególnie dogodnym i niejednokrotnie jedynym w wielu zastosowaniach technicznych.

Aktualne wykorzystanie laserów w obróbce powierzchniowej obejmuje głównie:

- Powierzchniowe nagrzewanie w celu spowodowania umocnienia na drodze zajścia przemian fazowych takich jak: hartowanie, czy przesycanie lub zmiękczenie na drodze rekrytalizacji.
- Powierzchniowe nadtapianie dla homogenizacji i rozdrobnienia mikrostruktury, wytworzenia struktur po szybkiej krystalizacji.
- Nadtapianie z domieszkowaniem stopowym w celu wprowadzania do warstwy wierzchniej dodatków metalicznych lub niemetalicznych.
- Wytwarzanie cienkich warstw na drodze ablacji i osadzania laserem impulsowym.
- ***Wytwarzanie tekstury na powierzchni materiału (tekstutowanie laserowe).***

Ostatnie zagadnienie stanowi przedmiot recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Kalinowskiego.

Zgodnie z wytycznymi Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej ustosunkuję się do poszczególnych punktów.

1. Ocena układu rozprawy w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Artura Kalinowskiego w formie wydrukowanej posiada 213 stron, w tym: wstęp i część teoretyczna; strony 1- 66 ; wnioski z analizy literatury, cele pracy, materiały, aparatura badawcza; strony 67 -90 , technologia laserowej mikroobróbki powłok DLC strony 91-108, wyniki badań i dyskusja strony 109-170, model matematyczny

objektu badań strony 171-190, wnioski strony 191-196, bibliografia strony 197-210, streszczenie strony 211-212, abstract strona 213. Układ pracy jest poprawny i przedstawiony w formie przejrzystej. Zawarte informacje są kompetentne i profesjonalne dając jasny pogląd na przedmiot badawczy pracy.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Autor cytuje 176 pozycji literaturowych i są to głównie aktualne pozycje światowe. Opiera się także o publikacje z krajowych ośrodków naukowych i własnego środowiska, w którym pracuje. Wykorzystane w pracy piśmiennictwo jest dobrze dobrane obejmują szerokie i aktualne spektrum publikacji krajowych, a głównie światowych.

3. Wskazanie oraz ocena celu pracy Kandydata

Doktorant w pracy przedstawia trzy cele, a mianowicie:

- Poznawczy
- Naukowy
- Aplikacyjny

Głównym problemem badawczym jest ocena właściwości eksploatacyjnych wytworzonych struktur powierzchniowych typu DLC o pożądanych cechach przy użyciu technologii PVD i mikroobróbki laserowej.

4. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych w ocenianej rozprawie doktorskiej

Doktorant w pracy zastosował bardzo szerokie spektrum metod badawczych opierając się głównie o wykorzystanie nowoczesnej metody wytwarzania powłok na bazie DLC, a następnie poddanie ich procesowi teksturowania laserowego w celu wytworzenia

modyfikowanej warstwy o podwyższonych właściwościach eksploatacyjnych. Wytworzone materiały poddane zostały laserowemu teksturowaniu powierzchni.

5. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Zagadnienie teksturowania powierzchni powłok DLC nie jest jeszcze dostatecznie zgłębione, stąd obecna praca doktorska. Autor zrealizował imponujący zakres badawczy. Obejmuje on zagadnienia: poczynawszy od wytwarzania powłok DLC poprzez bardzo szeroki zakres diagnostyki struktury i właściwości takich jak: nanotwardość, mikrotwardość oraz testy tribologiczne. Doktorant zrealizował również badania swobodnej energii powierzchniowej i kąta zwilżania, odporności korozyjnej, uszczelnienia czołowego. Przeprowadzone zostały matematyczne badania modelowe obejmujące takie elementy jak: energia impulsu laserowego, prędkość liniowa mikroobróbki laserowej, częstotliwość impulsów oraz inne czynniki związane ze sterowaniem mikroobróbki.

W pracy przeprowadzono kompleksową analizę wyników zrealizowanych badań i wyciągnięto wnioski o charakterze poznawczym i użytkowym. Doktorant przedstawił kierunki dalszych badań.

6. informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Doktorant zrealizował badania, tak poznawcze jak również skoncentrował się na kierunku użytkowym. Przedstawił wnioski wpływu zmodyfikowanej laserowo powierzchni na wartość oporów tarcia, co ma istotne znaczenia w mechanizmach maszyn. Oznacza to, że w wysokoobciążonych uszczelnieniach stosowanie powierzchni z większą liczbą struktur może być sposobem na zwiększenie nośności uszczelnienia.

7. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach które pojawiają się w ocenianej rozprawie doktorskiej

W pracy pojawiły się nieprawidłowości w części literaturowej związane głównie z niewłaściwym wykorzystaniem terminologii. Użycie terminu: **naprężenia wewnętrzne** (str. 14, 22, 27, 61) jest niewłaściwe, gdyż naprężenie jest stosunkiem obciążenia (które jest zewnętrzne) do powierzchni. W materiale mogą wystąpić: naprężenia (*in situ*) bądź naprężenia określane jako: własne (*niem. Eigenspannungen*) lub naprężenia szczątkowe (*ang. Residual stresses*) (str.39). Naprężenia własne pozostają w materiale po odjęciu obciążenia i mogą stanowić przedmiot pomiaru metodami niszczącymi lub nieniszczącymi.

Termin: moduł elastyczności (str. 19,62,75) jest wynikiem tłumaczenia *ang. Elastic modulus*, a chodzi o moduł sprężystości.

Czy występują łożyska o średnicy powyżej 10 m? (str.39).

Termin: *na wysokich prędkościach* (str.41) można zastąpić: z dużymi prędkościami.

8. Ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Rozprawa doktorska mgr inż. Artura Kalinowskiego stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie inżynierii powierzchni. Zrealizowane zostały badania doświadczalne, a także przeprowadzono modelowanie matematyczne procesu w którym uwzględniono czynniki wpływające na przebieg procesu mikroobróbki laserowej. Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

9. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

W oparciu o szczegółową analizę wszystkich elementów pracy doktorskiej mgr inż. Artura Kalinowskiego można z dużą pewnością stwierdzić, iż Autor zaprezentował szeroką wiedzę teoretyczną w dyscyplinie samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w aspekcie teoretycznym i eksperymentalnym spełniając kryteria dla pracownika naukowego na wysokim poziomie.

10. W przypadku gdy rozprawa doktorska zasługuje na wyróżnienie należy wskazać uzasadnienie postawionego wniosku

Podstawą wniosku o wyróżnienie stanowi bardzo profesjonalne i kompleksowe podejście do zagadnienia poprawy właściwości fizyko-chemicznych, eksploatacyjnych oraz możliwości praktycznego wykorzystania powłok na bazie DLC poddanych teksturowaniu laserowemu. Doktorant obok bardzo szerokiego zakresu doświadczalnego opartego o technologię laserową oraz diagnostykę strukturalną i badania właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych, podjął także matematyczne badania modelowe.

Całokształt zrealizowanych z sukcesem profesjonalnych badań uzasadnia wystąpienie o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Kalinowskiego.

11. Inne informacje lub uwagi istotne dla wyrażonego stanowiska zawartego w recenzji

Przed podsumowaniem pracy i sprecyzowaniem finalnej oceny chciałbym przedstawić zagadnienie, które Doktorant będzie mógł szerzej omówić w trakcie obrony.

Proponowałbym o szersze rozważenie wpływu parametrów lasera impulsowego na proces teksturowania powierzchni z wykorzystaniem ablacji laserowej takich jak:

- Długość fali; od podczerwieni (1064nm) do ultrafioletu (532nm)
- Długość impulsów: -nano, -piko, -femto. ato- sekundowych

Które z tych czynników są istotne dla procesów modyfikacji powierzchni.

12. Stwierdzenie czy osiągnięcia naukowe mieszczą się w zakresie wnioskowanej dziedziny i dyscypliny inżynieria mechaniczna. Jednoznaczna konkluzja wskazująca, czy w opinii Recenzenta zasadne jest wystąpienie do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej o ubieganie się o stopień doktora nauk technicznych.

Recenzent jednoznacznie stwierdza, iż po przeanalizowaniu całokształtu osiągnięć w rozprawie doktorskiej, złożony wniosek **mgr inż. Artura Kalinowskiego** odpowiada kryteriom stawianym kandydatom do uzyskania stopnia doktora i pozytywnie opiniuje wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej



(podpis Recenzenta)
(Bogusław Major)